

Institut für Plasmaphysik
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen

Ein Kollektorsystem für Kondensator-
batterien hohen Energieinhaltes

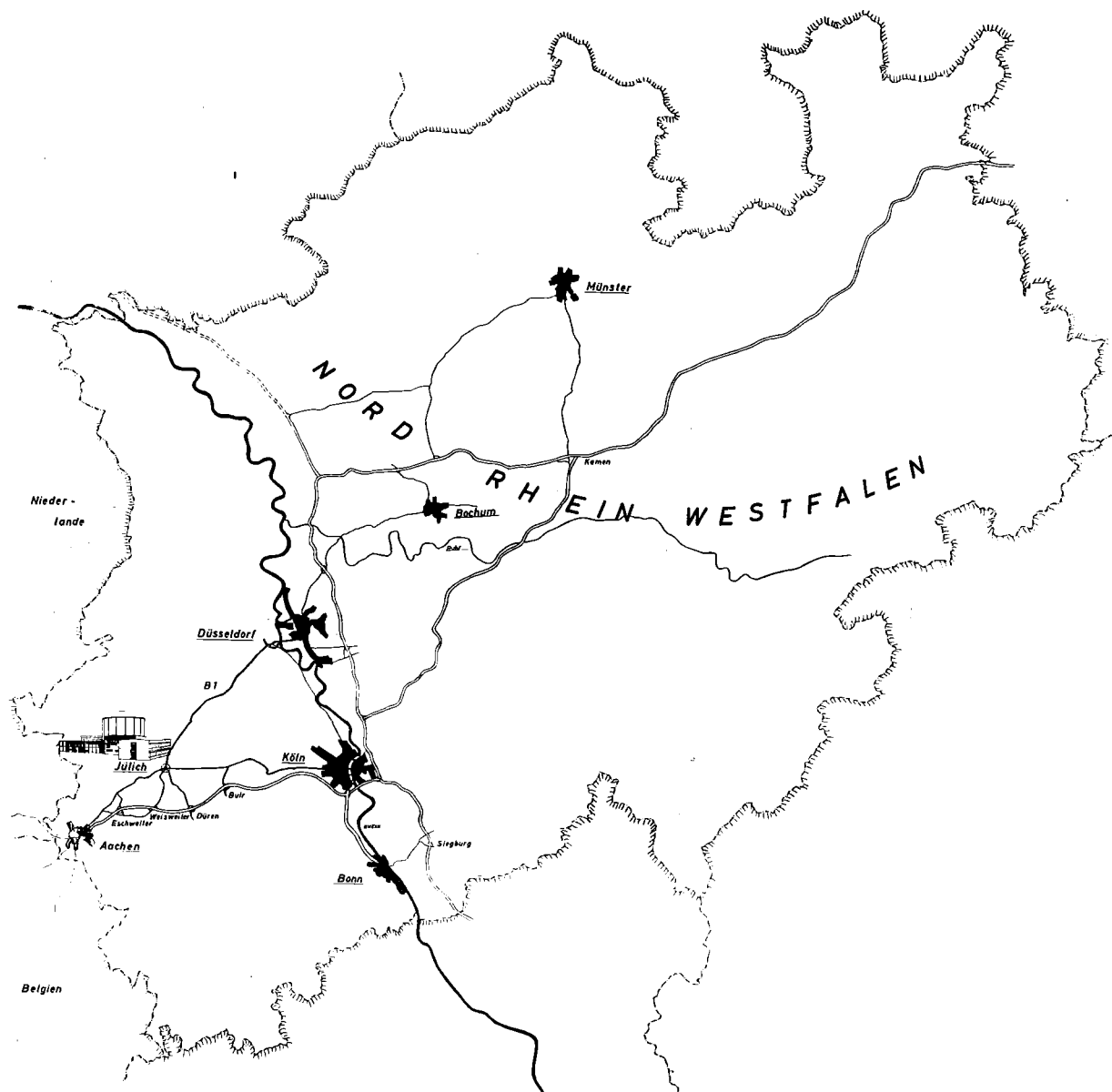
von

H. Fay und W. Anger

JÜL - 72 - PP

Oktober 1962

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr.72

Institut für Plasmaphysik Jülich – 72 – PP

Dok.: COLLECTOR SYSTEM - HEAVY - CURRENT CONDENSER BATTERIES

DK: 621.3.047.69

621.319.5

621.3.014.3

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Ein Kollektorsystem für Kondensator- batterien hohen Energieinhaltes

von

H. Fay und W. Anger

Herrn Professor Dr.-Ing. Wilhelm Fucks zum 60. Geburtstag
in dankbarer Verehrung gewidmet

Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich
des Landes Nordrhein-Westfalen – e. V., Jülich / Germany

Institut für Plasmaphysik
Kernforschungsanlage Jülich

EIN KOLLEKTORSYSTEM FÜR KONDENSATORBATTERIEN
HOHEN ENERGIEINHALTES

- I. AUFGABE EINES KOLLEKTORSYSTEMS
- II. DISKUSSION DES DOPPELPLATTEN-KOLLEKTORSYSTEMS
- III. GESCHICHTETE KOLLEKTORSYSTEME

I. AUFGABE EINES KOLLEKTORSYSTEMS

In einem früheren Bericht [1] wurde beschrieben, wie eine niederinduktive, betriebssichere Kondensatorbatterie großen Energieinhaltes aus gesonderten Batterieeinheiten aufzubauen ist. Die Einheiten werden über Leitungen bestimmter Länge mit der gemeinsamen Last, über die die Batterie entladen werden soll, verbunden. Die Aufgabe des Kollektorsystems ist es, den Anschluß der normalerweise sehr großen Anzahl von Leitungen (Größenordnung 1000) an die Last räumlich und elektrisch zu ermöglichen. Gleichzeitig muß das System die während der Entladung auftretenden hohen Stromkräfte (Größenordnung 1000 kp/cm^2) aufnehmen.

Naturgemäß wird sich die konstruktive Ausführung des Kollektorsystems nach der Art der verwendeten Anschlußleitungen und insbesondere nach den Gegebenheiten der Last richten. Das in Abs. III beschriebene System wurde für eine einwindige, gerade Lastspule und für Koaxialkabel als Anschlußleitungen entwickelt. Jedoch sind die dabei verwendeten Prinzipien durchaus allgemeinerer Art und lassen sich in den meisten Fällen unschwer auf andere Verhältnisse übertragen.

II. DISKUSSION DES DOPPELPLATTEN-KOLLEKTORSYSTEMS

1. Das bisher üblicherweise verwendete Kollektorsystem besteht im Prinzip aus zwei parallelen, gegeneinander elektrisch isolierten Platten, etwa nach Abb. 1. Am vorderen Rand ist die gerade, einwindige Lastspule angeschlossen; die übrigen Plattenränder können zum Anschluß der Kabel verwendet werden.

Erfolgt die Stromzuführung nur vom hinteren Plattenrand aus, so ist die Induktivität des Systems angenähert

$$L = \mu_0 \frac{l_0 \delta}{b_0} + \mu_0 \frac{l_1 \delta}{b_0 - b_1} \ln \frac{b_0}{b_1} .$$

Der erste Summand stellt die Induktivität des rechteckigen Kollektorteiles dar, der zweite die des trapezförmigen. Dabei ist angenommen, daß der Strom an den einander zugekehrten Oberflächen der Platten in einer, verglichen mit dem Plattenabstand, dünnen Schicht geführt wird. Die Dicke dieser stromführenden Schicht ist durch die Skintiefe gegeben.

$$\begin{aligned} \text{Mit den Werten } l_0 &= 50 \text{ cm, } b_0 = 200 \text{ cm} \\ l_1 &= 50 \text{ cm, } b_1 = 100 \text{ cm} \\ \delta &= 0,1 \text{ cm} \end{aligned}$$

erhält man als Induktivität

$$\begin{aligned} L &= 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ H} + 0,45 \cdot 10^{-9} \text{ H} \\ &\sim 0,8 \text{ nH} \end{aligned}$$

Diese Induktivität zählt zur inneren Induktivität der Kondensatorbatterie und sollte daher klein sein gegenüber der Induktivität der Lastspule ($\sim 10 \text{ nH}$ für einen Spulendurchmesser von 10 cm bei einer Spulenlänge von $l_1 = 100 \text{ cm}$).

Die als Beispiel angeführten Maße für das Kollektorsystem sind typisch. Sie sind im wesentlichen durch den Raumbedarf der Kabelanschlüsse bedingt. Verwendet man Koaxialkabel üblicher Abmessungen ($\varnothing \sim 1 \text{ cm}$), so können selbst entlang des 2 m langen Plattenrandes nur etwa $50 - 100$ Kabel in einer Ebene angeschlossen werden. Das hängt im einzelnen von der mehr oder weniger raumsparenden Ausführungsform der Anschlußstücke ab. In jedem Fall müssen daher die Kabel in mehreren Schichten übereinander angeordnet werden. Dies zeigt im Prinzip Abb. 2 für eine niederinduktive Ausführungsform.

2. Das zwischen den Platten entstehende Magnetfeld hat eine die Platten auseinandertreibende Kraft zur Folge. Die Kraftdichte p (Kraft/cm²) der auf die Platten ausgeübten Kraft ist

$$p = \frac{\mu_0}{2} H_o^2 = \frac{\mu_0}{2} j^2 \quad (2)$$

H_o ist die Magnetfeldstärke an der Plattenoberfläche und j (A/cm) eine "Stromdichte", die sich aus der echten Stromdichte (A/cm²) durch Integration über die Dicke der stromführenden Schicht ergibt. Ihr Wert läßt sich in einfach zu übersehenden Fällen sofort angeben. Wird z.B. in Abb. 1 längs des Randes b_o der Strom gleichmäßig zugeführt und ist sein Gesamtwert J , so ist die Stromdichte $j = J/b_o$. Der auf die Platten ausgeübte Druck ist demnach

$$p = \frac{\mu_0}{2} \frac{J^2}{b_o^2}$$

Mit $\frac{J}{b_o} = 10^5$ A/cm ergibt dies

$$p \sim 600 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} .$$

Durch Integration über die Plattenfläche erhält man die auf die Platten ausgeübte Gesamtkraft

$$K = \int_F \frac{\mu_0}{2} j^2 dF$$

Der Zusammenhang mit der im Volumen V zwischen den Platten gespeicherten magnetischen Feldenergie W ist unmittelbar zu übersehen:

$$W = \int_V \frac{\mu_0}{2} H^2 dV = \int_{\delta} \int_F \frac{\mu_0}{2} H^2 dF d\delta$$

$$\frac{dW}{d\delta} = \int_F \frac{\mu_0}{2} H_o^2 dF = \int_F \frac{\mu_0}{2} j^2 dF = K$$

Andererseits ist $W = L \frac{J^2}{2}$,

so daß man bei konstantem Strom J erhält

$$K = \frac{dL}{d\delta} \frac{J^2}{2} \quad (3)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (1) und (3) kann nunmehr die Gesamtkraft auf die Platten leicht berechnet werden:

$$K = \mu_0 \frac{J^2}{2} \left\{ \frac{l_0}{b_0} + \frac{l_1}{b_0 - b_1} \ln \frac{b_0}{b_1} \right\} \quad (4)$$

Mit $J = 10^7$ A, $l_0 = 50$ cm, $b_0 = 200$ cm, $l_1 = 50$ cm, $b_1 = 100$ cm erhält man

$$K \sim 1,5 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^6 \text{ [kp]} .$$

Die maximal auftretenden Kräfte liegen somit in der Größenordnung von tausenden von Tonnen. Jedoch treten diese Kräfte nur kurzzeitig auf. Mit $J = J_0 e^{-\gamma t} \sin \omega t$ ist der Verlauf der Kraft

$$K = K_0 e^{-2\gamma t} \sin^2 \omega t,$$

da die Kräfte nach Gl. (2) und (3) proportional dem Quadrat des Stromes sind. K_0 steht für den oben berechneten Maximalwert der Kraft. Für größere Kondensatorbatterien, wie sie z.Z. von Interesse sind, liegt die Dauer der Stromhalbwelle $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ bei einigen 10^{-5} sec, $\frac{1}{\gamma}$ bei einigen 10^{-4} sec.

3. Die auftretenden Kräfte müssen durch eine mechanische Verspannung der beiden Kollektorplatten aufgenommen werden. Die Forderungen an die Festigkeit einer solchen Verspannung lassen sich leicht übersehen:

Wie auch immer die Verspannung ausgeführt sein mag, während und nach der Kraftausübung durch das Magnetfeld werden die Kollektorplatten und das Verspannsystem teilweise oder als Ganzes gedämpft abklingende Schwingungen ausführen. Die maxi-

male Schwingungsamplitude der Kollektorplatten darf dabei nicht so groß werden, daß die an ihrem vorderen Rand angeschlossene Lastspule mechanisch zerstört oder aber die elektrische Kontaktierung zwischen Spule und Platten in einer Weise verschlechtert wird, daß Lichtbögen entstehen. Außerdem darf die Isolation zwischen den Platten durch das Schwingen des Systems nicht unzulässig hoch mechanisch beansprucht und so möglicherweise nach wenigen Batterieentladungen zerstört werden.

Die Dimensionierung einer Verspannung, die diese Forderungen erfüllt, stellt den Konstrukteur vor praktisch unlösbare Aufgaben. Eine statische Behandlung des Belastungsproblems ist nur so lange zutreffend, wie die charakteristische Zeit für die Änderung der belastenden Kräfte groß ist verglichen mit der Zeit, die Kompressions- und Scherungswellen benötigen, um durch das mechanische System hin- und zurückzulaufen. Damit ist gleichzeitig gesagt, daß die Frequenz des Kraftverlaufes klein sein muß gegenüber den Eigenfrequenzen des mechanischen Systems. Die Wellengeschwindigkeiten sind z.B. in Eisen für Kompressionswellen $6 \cdot 10^5$ cm/sec und für Scherungswellen $3 \cdot 10^5$ cm/sec. Innerhalb von 10 μ sec, der für den Kraftverlauf charakteristischen Zeit, legen sie also höchsten ~ 6 cm zurück. Da die charakteristischen Längen des Verspannungssystems aber mindestens von dieser Größenordnung sind, ist die statische Behandlung des Belastungsproblems somit nicht zutreffend. Sie wird zwar in vielen Fällen zu Dimensionierungen führen, die der wirklichen dynamischen Beanspruchung sicher gewachsen sind, die jedoch außerordentlich große Abmessungen aufweisen und daher hinsichtlich der technischen Durchführung fragwürdig erscheinen. Eine echte Dimensionierung ließe sich nur vornehmen, wenn das durch Kompressions- und Scherungswellen im Material erzeugte zeitlich veränderliche Spannungsfeld bekannt wäre. Jedoch ist dieses in komplizierteren Bauelementen der Berechnung praktisch unzugänglich. Wie die Betrachtung einfachster Beispiele schließen

läßt, sind die Spannungsverteilungen im dynamischen Fall, abgesehen von der zeitlichen Veränderlichkeit, vom statischen Fall grundverschieden. Dasselbe gilt für die auftretenden maximalen Spannungswerte, gemäß denen eine Konstruktion dimensioniert werden müßte.

Man wird sich also von der Festigkeit eines Verspannsystems unter den jeweils gegebenen Bedingungen nur durch die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen überzeugen lassen. Damit ist aber eine konstruktive Konzeption nötig, die es ermöglicht, Versuchsergebnisse, die an einem kleinen und also billigen Modell unter vergleichbaren Belastungsverhältnissen gewonnen wurden, auf die Konstruktion der beabsichtigten großen Ausführung zu übertragen. Unter diesem Gesichtspunkt sollten alle konstruktiven Bemühungen stehen. Geht man hiervon aus, so sollte die Verspannung der Kollektorplatten gleichsam kontinuierlich, d.h. flächenspezifisch, über die Plattenfläche erfolgen. Dies erfüllt angenähert eine Verspannung, wie man sie sich etwa durch genügend dicht angeordnete Bolzen nach Abb. 3 oder in der Form der Abb. 4 denken kann. Der für hinreichende Festigkeit notwendige Gesamtquerschnitt der Spannelemente pro einer Einheitsfläche der Kollektorplatten muß für den jeweiligen Belastungsfall durch Versuche bestimmt werden.

4. Das soeben beschriebene System besitzt zwei wesentliche Nachteile:

- a) Mit zunehmendem Querschnitt der Verspannelemente (d.h. der Bolzen in Abb. 3 oder der senkrechten Stege in Abb. 4) erhöht sich bei gleichbleibenden äußeren Abmessungen des Systems die Stromdichte und damit die auf die Kollektorplatten ausgeübte Kraft. Denn die für die Verstärkung der Verspannelemente benötigte Fläche der Kollektorplatten geht für die Stromführung verloren. Die auf die Kollektorplatten ausgeübte Kraft ist

$$K = \frac{\mu_0}{2} \int_{F_0 - F^*} j^2 dF$$

wo F_0 die gesamte, F^* die von den Verspannelementen beanspruchte, und $F_0 - F^*$ die für die Stromführung verfügbare Fläche ist. Den qualitativen Verlauf von K zeigen die Kurven I der Abb. 5. Kurvenparameter ist der Wert des Gesamtstromes. Die Kurve II gibt den Verlauf der von der Verspannung maximal aufnehmbaren Kraft $\sigma_m F^*$, wo σ_m (kp/cm²) die größte noch zulässige Spannung im Material ist. Alle zwischen den Schnittpunkten F_1^* und F_2^* liegenden Querschnittswerte sind ausreichend für die Verspannung des vom Gesamtstrom j^* durchflossenen Systems. Selbstverständlich wird man den kleinstmöglichen Wert wählen, da für ihn auch die Induktivität des Systems am kleinsten ist.

Der im System größtmögliche Gesamtstrom wird erreicht, wenn die Kurve I die Kurve II tangiert. Die Lage F_0^* des Berührungspunktes hängt, wie die Form der Kurven I, von der speziellen Ausführung der Verspannung ab.

Für das System der Abb. 4 gilt im Fall maximalen Gesamtstromes

$$\frac{F_0^*}{F_0} = \frac{1}{2} .$$

Nur die halbe Breite des Systems ist also an der Stromführung beteiligt. Die größtmögliche Stromdichte ergibt sich zu

$$j_m^2 = \frac{2}{\mu_0} \frac{F_0^*}{F_0 - F_0^*} \sigma_m = \frac{2}{\mu_0} \sigma_m .$$

Mit $\sigma_m = 5000$ kp/cm² für Stahl erhält man $j_m = 300$ kA/cm.

Der maximale Gesamtstrom ist

$$J_o = j_m \frac{b}{2},$$

wo b die Breite des Systems ist. Die maximale "effektive" Stromdichte $\frac{J_o}{b}$, bezogen auf die Gesamtbreite, ist somit

$$j_{\text{eff}} = \frac{j_m}{2} = 150 \text{ kA/cm}.$$

Man kann zeigen, daß das System nach Abb. 4 hinsichtlich der eben betrachteten Zusammenhänge das günstigste ist und den größten Wert für die maximal mögliche effektive Stromdichte aufweist. Daraus folgt allgemein, daß Doppelplattenkollektoren, die flächenspezifisch, also unabhängig von der Größe des Systems verspannt sind, nur bis zu effektiven Stromdichten von $\sim 150 \text{ kA/cm}$ verwendet werden können.

Es war bisher vorausgesetzt worden, daß die Festigkeit des in der Verspannung verwendeten Isoliermaterials (s. Abb. 3, 4) mit der von Stahl vergleichbar sei, was für die meisten Isoliermaterialien kaum zutreffend sein dürfte. Der angegebene Wert für die maximal mögliche effektive Stromdichte kann somit erheblich niedriger liegen und nur durch die Festigkeit des Isoliermaterials bestimmt sein.

- b) Im Ruhezustand muß die zwischen den Kollektorplatten liegende Isolationsfolie die Verspannkraft der Bolzen aufnehmen; sie ist also auf Druck vorgespannt. Während der Schwingung des mechanischen Systems erfährt die Folie eine Druckbeanspruchung, die beim Auseinanderschwingen der Platten vollständig verschwindet, beim Zusammenschwingen der Platten aber weit über die des Ruhezustandes anwachsen kann. Diese dynamische Beanspruchung kann unter Umständen nach wenigen Batterieentladungen zur Zerstörung der Isolationsfolie führen.

Häufig glaubt man, dies vermeiden zu können, wenn man die Bolzen genügend stark vorspannt. Denn dann sei einmal die Schwingungsamplitude des Systems während der Entladung kleiner, zum anderen komme die vorgepresste Isolationsfolie auch während der Schwingung der Platten nicht aus dem Zustand der Druckbeanspruchung heraus. Die schlagartige Beanspruchung der Folie beim Zurückschwingen der Platten könnte also vermieden werden. Damit diese Vorteile wirklich auftreten, müssen die durch die vorgespannten Bolzen auf das System ausgeübten statischen Kräfte möglichst groß sein, verglichen mit den während der Entladung auftretenden magnetischen Kräften. Dies allerdings setzt ein auf Druck außerordentlich hoch beanspruchbares Isolationsmaterial voraus mit einer Druckfestigkeit von mindestens $5000 - 10\,000 \text{ kp/cm}^2$, wenn man von einem magnetischen Druck von etwa 1000 kp/cm^2 (entsprechend einer Stromdichte von nur $\sim 130 \text{ kA/cm}$) ausgeht. Außerdem addieren sich in den Bolzen die für die Vorspannung aufzubringenden Kräfte und die magnetischen Kräfte. Je höher somit die Vorspannung ist, desto niedriger liegt die oben besprochene Grenze der "effektiven" Stromdichte des Systems. Würde man z.B. eine Vorspannung in den Bolzen wählen, die gleich dem zehnfachen der durch das Magnetfeld verursachten Spannung ist, so würde das System nur noch eine maximale "effektive" Stromdichte von 50 kA/cm zulassen.

5. Es muß noch besprochen werden, wie weit die magnetischen Kräfte durch die Trägheit der Masse der Kollektorplatten abgefangen werden können. Der vom Magnetfeld auf eine Kollektorplatte ausgeübte Druck sei p , die Dichte des Plattenmaterials sei ρ . Als zeitlicher Verlauf des Druckes werde ein Rechteckimpuls der Dauer t angenommen. In das Material läuft während der Kraftausübung eine Kompressionswelle mit der Geschwindigkeit c hinein. In ihr ist die materielle Geschwindigkeit v und damit die Geschwindigkeit

der beanspruchten Plattenoberfläche gegeben durch

$$v = \frac{p}{\rho c} .$$

Mit $\rho = 8 \text{ g/cm}^3$, $c = 6 \cdot 10^5 \text{ cm/sec}$ und $p = 1000 \text{ kp/cm}^2$ ergibt sich $v \sim 200 \text{ cm/sec}$. Für die Plattendicke d ist dabei $d \gg ct$ vorausgesetzt, damit während der Dauer des Kraftimpulses Reflexionen an der entgegengesetzten Plattenoberfläche noch nicht auftreten. Selbst wenn somit d beliebig groß ist, ergibt sich eine Bewegung der Plattenoberfläche in $10 \text{ } \mu\text{sec}$ um $s \sim 0,02 \text{ mm}$. Die vom Magnetfeld auf die Platte pro cm^2 Fläche übertragene Energie ist

$$E = pvt = \frac{p^2 t}{\rho c} ,$$

von der die eine Hälfte als kinetische Energie des Plattenmaterials, die andere als elastische Verformungsenergie auftritt. Der der Platte pro cm^2 Fläche mitgeteilte Bewegungsimpuls ist

$$P = pt = v\rho ct.$$

Die auf die Platte übertragene Energie muß von der Verspannung in Form elastischer Verformungsenergie aufgenommen werden; dies allerdings erst zu einer Zeit, die durch die Laufzeit der mechanischen Spannungswellen im System festgelegt wird und zu der der Kraftimpuls bereits wieder abgeklungen ist.

Die von der Platte aufgenommene Energie ist also unabhängig von der Gesamtmasse der Platte; die Platte verhält sich nicht wie ein starrer Körper. Eine über die Dicke $d = c \cdot t$ hinausgehende Massenbelegung der Kollektorplatten kann höchstens dann für die Aufnahme der Kräfte eine Rolle spielen, wenn die Dämpfung der Spannungswellen im Material berücksichtigt wird. Denn jede zusätzliche Massenbelegung bedeutet eine Verlängerung des von den Spannungswellen zu durchlaufenden Weges und damit eine zusätzliche Dämpfung.

Anders liegen die Verhältnisse natürlich, wenn die Schwere der Platte zum Abfangen der Kräfte ausgenutzt wird, indem man die Platte gegen das Schwerfeld hochlaufen läßt. Ist m die Gesamtmasse pro cm^2 Plattenfläche, so ist der Hub der Platte gegeben durch

$$h = \frac{E}{2 mg} .$$

Die infrage kommenden Größenordnungen sind jedoch hoffnungslos. So müßte eine Platte aus Eisen ($\rho \sim 8\text{g/cm}^3$) eine Dicke von 60 m haben, damit sie sich um nur $h = 0,5\text{ mm}$ hebt, wenn $p = 1000\text{ kp/cm}^2$ und $t = 20\text{ }\mu\text{sec}$ ist.

6. Zum Schluß seien einige allgemeine Gesichtspunkte zur Materialwahl gegeben:

Die Stromführung erfolgt immer auf der Oberfläche des Materials in einer Schicht, deren Dicke durch die Skintiefe τ gegeben ist:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu \sigma \pi f}}$$

Hierin sind μ Permeabilität, σ elektrische Leitfähigkeit ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) und f Frequenz [Hz]. Die Permeabilität μ ist auch bei Verwendung ferromagnetischer Werkstoffe praktisch gleich 1 zu setzen, da in den meisten Fällen das Material über die Sättigungsgrenze magnetisiert wird.

Ist die Skintiefe τ vergleichbar mit der Dicke δ (s. Abb. 1) des mit Magnetfeld erfüllten Spaltes zwischen Hin- und Rückleiter, so muß die Energie des längs τ im Material abfallenden Magnetfeldes mit berücksichtigt werden. Die Induktivität des Systems wird entsprechend größer. Die erste Forderung an das verwendete Material ist daher, daß es, soweit es zur Stromführung verwendet wird, eine genügend hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt. Als

zweite Forderung muß seine Festigkeit so groß sein, daß der Druck des Magnetfeldes das Material nicht plastisch verformt. In Tab. 1 sind die interessierenden Daten für verschiedene Werkstoffe zusammengestellt. Danach läßt sich Kupfer als stromführendes Material nur bis zu magnetischen Feldstärken von ~ 100 kG verwenden. Die bevorzugten Werkstoffe dürften Messing und Cu-Be sein, letzteres aber erst für Feldstärken über ~ 250 kG. Stahl dürfte nur dort zur Verwendung kommen, wo die mit der kleineren elektrischen Leitfähigkeit verbundene höhere Induktivität keine Rolle spielt. Bei Feldern oberhalb ~ 500 kG wird auch Cu-Be plastisch.

7. Zusammenfassung

Gegen einen Doppelplatten-Kollektor der beschriebenen Form bestehen im wesentlichen zwei Einwände prinzipieller Art:

- a) Ein mechanisches Verspannungssystem, das unabhängig von der Größe der Kollektorplatten ist, kann nur auf Kosten der Fläche der stromführenden Platten und damit auf Kosten einer niedrigen Stromdichte im System verwirklicht werden. Die Stromdichte in einem solchen Kollektor ist daher begrenzt. Der maximal mögliche Wert der effektiven Stromdichte dürfte bei 150 kA/cm liegen.
- b) Da die beiden Platten über die zwischen ihnen liegende, aus Induktivitätsgründen möglichst dünne Isolation verspannt sind, besteht die Gefahr, daß beim Schwingen der Platten während und nach der Kraftbeanspruchung die Isolation zerstört wird.

Kollektorsysteme der diskutierten Art wurden an mehreren Stellen entwickelt. Insbesondere ist das von A.C. Kolb und Mitarbeitern im Naval Research Laboratory, Washington D.C. für eine 2 MJoule-Batterie gebaute System zu nennen [2].

III. GESCHICHTETE KOLLEKTORSYSTEME

Aus der Überzeugung, daß die in Abs. II dargelegten Nachteile des einfachen Doppelplattenkollektors seine Verwendung für Magnetfelder $> 200 \text{ kG}$ ausschließen, entstand der Wunsch, ein Kollektorsystem ohne solche Nachteile zu entwickeln. Der Anlaß für diese Aufgabenstellung war der Bau einer 600 kJ -Kondensatorbatterie für Experimente zur schnellen magnetischen Kompression von Plasma. Die Entwicklung dieser Kondensatorbatterie, für die noch ohne Schwierigkeiten ein einfaches Doppelplatten-Kollektorsystem hätte gebaut werden können, das für die vorgesehenen experimentellen Aufgaben ausreichend gewesen wäre, bot eine gute Gelegenheit, die neuen Vorstellungen zu erproben.

Ausgegangen wurde von der Forderung, die Kollektorplatten kontinuierlich zu verspannen, ohne die für die Stromführung zunächst verfügbare gesamte Breite b des Systems (s. Abb. 1) merklich einzuschränken. Diese Forderung kann erfüllt werden, wenn die Länge l (s. Abb. 1) der Platten klein ist ($10 - 20 \text{ cm}$), und ihre Verspannung durch eine die Platten längs der Breite b umgreifende Klammer erfolgt. Dadurch geht zunächst der rückwärtige Rand der Platten für den Anschluß der Kabel verloren, weil er von der Verspannklammer verdeckt wird. Die Klammer muß daher so ausgebildet werden, daß längs der gesamten Breite b die Stromzuführung an die Kollektorplatten durch die Klammer hindurch möglich wird. Die mechanische Festigkeit der Klammer darf dabei nicht unzulässig stark geschwächt werden.

Eine Prinzipdarstellung des sich so ergebenden Kollektorsystems zeigt Abb. 6. Der Anschluß der Kabel erfolgt an viele nebeneinander geschichtete und gegenseitig elektrisch isolierte Metallplatten, deren Ebenen senkrecht zur Spulenachse stehen. Die Platten sind durch Übergangsstücke mit den beiden Sammelschienen verbunden, die gleichsam die Reste des Doppelplattensystems darstellen. Die Ver-

spannung der Sammelschienen wird mit Hilfe der an den Vorderseiten als Klammern ausgebildeten senkrechten Platten vorgenommen. Die Entladungsspule ist an die Sammelschienen angeschlossen.

1. In Abb. 7 ist die Rückansicht des Plattenstapels dargestellt, aus der die Art und Weise der Schichtung hervorgeht. Die dicken Platten, die auf Erdpotential liegen, sind an den Rändern, wo sie sich berühren, durch Bolzen miteinander verspannt. Die in die Ausfräsungen elektrisch isoliert eingebrachten dünnen Platten liegen während der Entladung auf Hochspannungspotential. Die Ausfräsungen sind so tief, daß beim Verspannen der dicken Platten das Isolationsmaterial nicht gepreßt wird.

Die Kabel werden an der Rückseite des Plattenstapels mit der Seele an die dünnen Platten, mit dem Mantel alternierend an die beiden jeweils benachbarten dicken Platten angeschlossen. (Die technische Ausführung der Kabelanschlüsse soll hier nicht besprochen werden.) Außerdem werden die Kabel so aufgeteilt, daß die gleiche Anzahl auf jede dünne Platte entfällt. Durch diese Anschlußart wird erreicht, daß alle Platten gleichmäßig an der Stromführung beteiligt sind. Die Notwendigkeit hierfür wird sich unten ergeben.

Die Form der dünnen Platten geht aus Abb. 6 hervor. Überträgt man die in Abb. 1 gewählten Bezeichnungen sinngemäß, so beschreibt Gleichung (1) die Induktivität des Leitersystems, das aus einer dünnen Platte als Hinleiter und einer der beiden benachbarten dicken Platten als Rückleiter gebildet wird. Mit $b_0 = 150 \text{ cm}$, $l_0 = 20 \text{ cm}$, $b_1 = 5 \text{ cm}$, $l_1 = 10 \text{ cm}$, $\delta = 0,1 \text{ cm}$ erhält man

$$L \sim 0,5 \text{ nH.}$$

Die Induktivität des Einzelsystems ist somit vergleichbar mit der des Doppelplattenkollektors. Die Induktivität des aus n dünnen und $n + 1$ dicken Platten gebildeten Plattenstapels ist dann

$$L_n = \frac{L}{2n} ,$$

denn die Einzelsysteme können als parallel geschaltet angesehen werden, wenn sich der Gesamtstrom gleichmäßig auf die einzelnen Systeme verteilt. Das letztere wird durch die bereits besprochene Anschlußart der Kabel erzwungen. Die Induktivität L_n des Plattenstapels kann somit durch Verwendung entsprechend vieler Platten sehr klein gemacht werden. Pro Meter Stapellänge läßt sich für n mühelos ein Wert von ~ 25 verwirklichen.

In ähnlicher Weise verringern sich die im Plattenstapel wirksamen Stromkräfte. Denn in den Ausdruck Gleichung (4) für die auf eine Platte von einer Seite her ausgeübte Kraft geht zwar weiterhin die Induktivität des Einzelsystems ein, aber an Stelle des gesamten Kollektrostromes J nur noch der auf einer Plattenseite geführte Strom $J/2n$. Die Kräfte erniedrigen sich also annähernd im Verhältnis $1/4 n^2$ im Vergleich zum einfachen Doppelplattenkollektor. Betrachtet man eine Platte im Innern des Stapels, so halten sich die an ihr von beiden Seiten gleich stark wirkenden Kräfte das Gleichgewicht. Die Platte verharrt während der Entladung als Ganzes in Ruhe. Nur die Kräfte auf die beiden Deckplatten des Stapels müssen durch eine Verspannung aufgenommen werden, Da aber nach dem gesagten diese Kräfte vergleichsweise gering sind, können sie mühelos von den Bolzen aufgenommen werden, die den Stapel zusammenhalten. Die beschriebene Anordnung vereinigt also die Vorteile sehr geringer Induktivität, kleiner Stromkräfte, die sich leicht abfangen lassen, und einer zu jeder Zeit mechanisch nicht beanspruchten elektrischen Isolation.

2. In Abb. 8a ist am Beispiel einer dicken und den beiden benachbarten dünnen Platten gezeigt, wie die Platten für den Anschluß an die Sammelschienen ausgebildet sind. Der dem Betrachter zugewendete Kontaktklotz an der vorderen dünnen Platte wurde abge-

brochen, um die Übersichtlichkeit zu wahren. Die an den dünnen Platten befestigten Kontaktklötze werden an die obere, die dicken Platten an die untere Sammelschiene angeschlossen, wie es Abb. 9 im Schnitt zeigt. Die Ausbildung der eigentlichen Kontaktstellen ist nur angedeutet.

Wenn man bedenkt, daß der Strom nur an der Oberfläche der Leiter fließt, und daß die Stromdichte dort am größten ist, wo Hin- und Rückleiter des Stromes am dichtesten aneinander liegen, so erkennt man, daß das in Abb. 8a gezeichnete Leitersystem dem in Abb. 8b dargestellten im wesentlichen äquivalent ist. Das aber entspricht dem in Abb. 8c wiedergegebenen parallelen Plattensystem. Der Wert für D ist durch die Stärke der dicken Platte festgelegt, für l ist die bei der Isolation der Übergangsstücke zu berücksichtigende elektrische Kriechweglänge maßgebend. Typische Werte sind $D \sim 40$ mm und $l \sim 65$ mm. Für die Induktivität eines Übergangsstückes ergibt sich damit

$$L \sim 5 \text{ nH.}$$

Die Gesamtinduktivität aller Übergangsstücke ist dann

$$L_n = \frac{L}{n},$$

da sie, wie es ähnlich bereits im Fall des Plattenstapels besprochen wurde, als parallel geschaltet betrachtet werden können.

Die Übergangsstücke bewirken gewissermaßen die Verwindung der vielen stromführenden Ebenen des Plattenstapels in die eine Ebene der Sammelschienen. Die Kontaktklötze können dabei bereits als Teil der oberen Sammelschienen aufgefaßt werden. Das gilt auch hinsichtlich der Belastung, da sie durch das Magnetfeld aufwärts gerichtete Kräfte erfahren, die nicht mehr, wie bei den senkrechten Platten, mit entsprechenden Gegenkräften im Gleichgewicht stehen. Geeignete Übergangsstücke lassen sich in vielfälti-

gen Formen ausbilden. Die beschriebene Ausführung wurde nach der praktischen Überlegung gewählt, daß die elektrische Isolation ohne komplizierte Formstücke nur mit Isolationsfolie in einfacher Weise durchführbar sein sollte. Die Art und Weise der Isolation ergibt sich im einzelnen aus Abb. 10.

3. Die Anordnung der Sammelschienen geht aus den Abb. 6 hervor. Die untere Schiene, die sich auf Erdpotential befindet, liegt in einer Ausfräsung des Plattenstapels. Sie ragt an den Enden über den Plattenstapel hinaus und stützt dort über zwei Klötze aus Isoliermaterial die obere Sammelschiene ab. Die Höhe der Klötze ist so bemessen, daß zwischen den Sammelschienen auch bei eingelegter Isolation noch ein Luftspalt bleibt, über dessen Aufgabe noch zu sprechen sein wird. Da die obere Sammelschiene nur an den Enden aufliegt, würde sie sich bei langen Kollektorsystemen wegen ihres Eigengewichtes durchbiegen und möglicherweise im mittleren Teil der Isolation aufliegen. Dies wird durch die angeschlossene Entladungsspule verhindert, die wie eine aufspringende Zylinderfeder wirkend, die obere Sammelschiene über die Zwischenisolation gegen den oberen Teil des Plattenstapels preßt. Somit liegt die Isolation auch bei sehr langen Systemen frei zwischen den Sammelschienen. Werden nun noch die Kontaktklötze (s. Abb. 6, 9) an der oberen Sammelschiene befestigt, so wird auch in den Übergangsstücken das Isolationsmaterial mechanisch nicht beansprucht. Damit ist im gesamten Kollektorsystem die Isolation mechanisch entlastet.

Die Induktivität des aus den Sammelschienen und dem Spulenschluß bis zum Beginn der Spulenbohrung gebildeten Stromsystems ist

$$L = \mu_0 \frac{l \delta}{b}$$

Hierin ist l die Länge von den Enden der Kontaktklötze bis zum

Beginn der Spulenbohrung, b die Länge der Spule, die gleich der Breite des Plattenstapels angenommen wird, und δ die Spaltdicke zwischen den Sammelschienen. Mit $l = 15 \text{ cm}$, $b = 100 \text{ cm}$, $\delta = 0,2 \text{ cm}$ erhält man

$$L \sim 0,4 \text{ nH}$$

Zur Berechnung der auf die Sammelschienen ausgeübten Kraft ist die Länge l einschließlich der Kontaktklötze zu nehmen. Nach Gleichung (3) erhält man

$$K = \mu_o \frac{1}{b} \frac{J_o^2}{2} = \frac{\mu_o}{2} l b j^2 .$$

Die pro cm Länge der Sammelschiene ($b = 1 \text{ cm}$) durch das Magnetfeld auf die Sammelschienen ausgeübte Maximalkraft ist

$$K = \frac{\mu_o}{2} l j^2 \sim 10^4 \text{ kp} = 10 \text{ t} ,$$

wenn $j = 100 \text{ kA/cm}$.

Diese Kraft muß von den die Sammelschienen wie Klammern umschließenden dicken Platten aufgenommen werden, Die Klammerwirkung ist umso stärker, je flacher die für die dünnen Platten benötigten Einfräsungen im rückwärtigen Teil der dicken Platten sind (s. Abb. 6, 7) . Die dünnen Platten müssen also wirklich dünn sein verglichen mit den dicken Platten. Hieraus rechtfertigt sich die Bezeichnungsweise.

Bis zu welcher Höhe die auftretenden Kräfte von der Verklammerung aufgenommen werden können, kann nach den bereits in Abs. II angeführten Überlegungen hinsichtlich der Festigkeitsbeurteilung im dynamischen Belastungsfall nur das Ergebnis experimenteller Untersuchungen entscheiden. Diese lassen sich relativ schnell und ohne große Kosten ausführen, da bereits ein System aus etwa zwei dünnen und drei dicken Platten mit entsprechender Länge der Sammelschienen und der Entladungsspule alle Unterlagen über die

Festigkeit des Systems liefern kann.

Die von den Platten aufzunehmenden Gesamtkräfte sind umso kleiner, je kürzer der Abstand l zwischen den Kontaktklötzen und dem Beginn der Spulenbohrung ist. Der angegebene Wert von 15 cm ist durch die Notwendigkeit gegeben, bei der elektrischen Isolierung dort, wo sich die Isolationsfolien überlappen, die elektrischen Kriechweglängen einzuhalten. Würde man den Aufwand komplizierter Isolierformstücke zulassen, so könnte der Wert l auf etwa $1/3$ erniedrigt werden. Im gleichen Verhältnis würde die Gesamtkraft kleiner. Dieser Aufwand rechtfertigt sich jedoch nur für Systeme unter sehr hoher Belastung, bei denen die aus den Platten gebildeten Klammern bis zur Grenze ihrer Festigkeit beansprucht werden.

Die Kräfte auf die obere Sammelschiene werden durch die Zwischenisolation auf das Plattenpaket übertragen. In keinem Fall dürfen daher so große Kräfte auftreten, daß die zulässige Flächenpressung des Isolationsmaterials überschritten wird. Da die Fläche der stromführenden Schicht gleich der die Kraft aufnehmenden Fläche des Isoliermaterials ist, bedeutet dies, daß

$$\sigma_{\max} \geq \frac{\mu_0}{2} j^2,$$

wenn σ_{\max} die zulässige Druckbeanspruchung des Isoliermaterials ist. Der Wert von σ_{\max} liegt für übliche Isoliermaterialien bei $\sim 3000 \text{ kp/cm}^2$. Das entspricht Stromdichten von $j \sim 200 \text{ kA/cm}$, bzw. Magnetfeldstärken von $\sim 250 \text{ kG}$. Die Verwendung von Porzellan mit $\sigma \sim 12000 \text{ kp/cm}^2$ würde die maximale Stromdichte auf $\sim 400 \text{ kA/cm}$ heraufsetzen. Hier würde dann bereits die Grenze der Festigkeit von Cu - Be (s. Tab. 1) erreicht.

Selbstverständlich wird das System bei hohen Belastungen zu schwingen beginnen. Die von den dicken Platten gebildeten Klammern werden durch die Kräfte aufgedrückt und schwingen anschließend in die Ruhelage zurück. Damit beim Überspringen über die Ruhelage hinaus die zwischen den Sammelschienen lie-

gende Isolation nicht gefährdet wird, wurde der bereits erwähnte Luftspalt zwischen den Sammelschienen vorgesehen. Seine Dicke muß demnach mindestens gleich der maximalen Schwingungsamplitude der Sammelschienen sein, ein Wert, der nur experimentell festgelegt werden kann.

Es muß noch darauf hingewiesen werden, daß es ohne weiteres möglich ist, die beiden Sammelschienen in gleicher Weise wie den Plattenstapel zu unterteilen. Wird außerdem die Entladungsspule aus Spulenstücken zusammengesetzt, deren Länge jeweils gleich der Dicke der dicken Platten ist, so kann ein Spulenstück mit den zugehörigen Stücken der unterteilten oberen und unteren Sammelschienen als ein Bauelement ausgeführt werden. Die elektrische Unterteilung des Kollektorsystems, wie sie im Plattenstapel vorliegt, ist dann konsequent bis zur Entladungsspule durchgeführt. Das ist mit mehreren Vorteilen verbunden:

- a) Da die Verbindungskabel zur Batterie gleichmäßig verteilt an den Plattenstapel angeschlossen sind, führt jedes Spulenstück denselben Gesamtstrom. Inhomogenitäten des Magnetfeldes in der Spule in Achsenrichtung können sich daher nicht ausbilden wie bei durchgehenden Sammelschienen, bzw. Entladungsspulen.
- b) Im Fall eines elektrischen Durchschlages im System entlädt sich zunächst nur der zur entsprechenden Kollektorschicht gehörende Batterieanteil in den Kurzschluß. Da das zur defekten Kollektorschicht gehörende Spulenstück eine Kopplungswindung an das Spulenfeld des restlichen Kollektorsystems darstellt, wird sicher auch ein Teil der übrigen Batterieenergie in der Kurzschlußstelle dissipiert. Jedoch selbst in dem Grenzfall, daß das Spulenstück eine ideale Kurzschlußwindung darstellt, ist der auftretende Strom nicht größer als J_0 / n , wo n die Zahl der dicken Platten und J_0 der gesamte Kollektorstrom ist. In Wirklichkeit richtet sich seine Größe noch nach der Verteilung der Induktivitäten im Kollektorsystem und im Kurzschlußpfad

und nach der Kopplung der einzelnen Spulenstücke untereinander. Ein geringer Abstand zwischen den Spulenstücken dürfte in diesem Zusammenhang günstig sein, jedoch können die Verhältnisse endgültig nur im Versuch geklärt werden.

4. Die Entladungsspule wurde nach Gesichtspunkten ausgebildet, die sich aus den durchzuführenden Experimenten ergeben. Diese Gesichtspunkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:
 - a) Die Spulenlänge soll veränderbar sein. Dies wird dadurch erreicht, daß die Spule aus aneinander gereihten Spulenstücken von je 10 cm Breite zusammengesetzt wird. Durch Ansetzen oder Wegnehmen von Spulenstücken kann die Spule um Vielfache der Spulenstückbreite verlängert oder verkürzt werden.
 - b) Die Entladungsspule umschließt das aus Glas, Quarz oder Keramik bestehende Entladungsrohr. Sind an das Rohr zwei radial ausgerichtete Rohrstutzen zur Einführung von Meßsonden in das Innere des Entladungsrohres angesetzt, so können die Spulenstücke nicht mehr in axialer Richtung über das Rohr zwischen die Stutzen geschoben werden. Die Spulenstücke müssen also halbiert und die beiden Hälften an den Sammelschienen so angebracht werden, daß sie nach dem Lösen der Befestigung nach oben und unten hin vom Entladungsrohr fortgenommen werden können. Diese Konstruktion hat den weiteren Vorteil, daß die Spulenlänge variiert werden kann, ohne daß beim Ansetzen oder Wegnehmen der Spulenstücke das Entladungsrohr entfernt werden muß.

Die beiden Hälften jedes Spulenstückes werden von Klammern umfaßt, die einmal die bei der Entladung in den Spulenstücken auftretenden Kräfte aufnehmen, zum anderen aber die in Abs. III, 3 beschriebene Aufgabe erfüllen, die obere Sammelschiene gegen den oberen Teil des Plattenstapels zu pressen.

Eine Prinzipdarstellung der beschriebenen Konstruktion zeigt Abb. 11. Nach dem Lösen der Keile kann die Spulenklammer nach vorne abgezogen werden. Die Spulenstückhälften können dann nach oben und unten hin vom Entladungsrohr fortgenommen werden.

5. Die Gestaltung der elektrischen Kontaktstücke zwischen den einzelnen Bauelementen des Kollektorsystems ist ein schwieriges Problem, das in gleichem Maße bei jedem Kollektorsystem, unabhängig von der speziellen Konstruktion, auftritt.
- Zunächst ist zu berücksichtigen, daß der Strom im Leiter nur in einer dünnen Oberflächenschicht mit entsprechend hoher Stromdichte geführt wird. Dasselbe gilt für einen Kontakt. Das bedeutet, daß bei zwei gut aufeinandergepreßten Kontaktflächen nur der äußere Rand der Flächen bis zu einer Tiefe gleich der Skintiefe für die Stromübernahme wirksam ist. Die Stromdichte kann somit im Kontakt nicht etwa herabgesetzt werden, indem möglichst große Kontaktflächen verwendet werden. Bei einer magnetischen Feldstärke von 100 kG an der Oberfläche des Kontaktes und einer Skintiefe von 0,8 mm (s. Tab. 1) beträgt z.B. die Stromdichte im Kontakt $\sim 10 \text{ kA/mm}^2$. Stromdichten dieser Größe können ohne das Auftreten von Lichtbögen nur übernommen werden, wenn der Kontaktdruck sehr hoch ist. Das ist umso leichter zu erreichen, je kleiner die Kontaktfläche ist. Die mechanisch tragende Kontaktfläche sollte somit nicht größer sein als die infolge des Skineffektes für die Stromübernahme auch wirklich wirksame Fläche. Sie sollte aber auch nicht kleiner sein, da sonst nur ein Teil des Stromes vom Kontakt übernommen würde. Der andere Teil würde auf den zwischen den Kontaktstellen liegenden Oberflächen fließen und dort an Stoßstellen zu unkontrollierten Stromübergängen in Form von Lichtbögen führen. Für die Aufteilung des Stromes an dem zu dünnen Kontaktstück ist neben dessen Dicke d auch das Verhältnis der Induktivitäten der sich einstellenden Stromsysteme maßgebend. Die Verhältnisse seien in Abb. 12a

anhand eines einfachen Beispielen erläutert. Das Kontaktstück verbindet die als "Hinleiter" bezeichneten Bauteile. Ist d größer als die Skintiefe, so wird bei genügend hohem Kontaktdruck der Strom einwandfrei überführt. Ist d kleiner als die Skintiefe, so fließt ein Teil des Stromes auf der hinter der Kontaktfläche wieder freien Oberfläche etwa nach A, wo er z.B. in einer Stoßstelle zum anliegenden Bauteil übergeführt wird. Da der Kontaktdruck dort aber vergleichsweise klein ist, kommt es zu Lichtbogenserscheinungen. Dies kann sich wiederholen, etwa bei B, C usw.

Das wesentliche Problem bei der Konstruktion geeigneter Kontakte besteht nun darin, daß während der Entladung der Kontaktdruck hinreichend groß aufrecht gehalten wird. Denn einmal führen die miteinander zu kontaktierenden Bauteile des Kollektorsystems Relativbewegungen aus, die durch die auf sie ausgeübten Kräfte hervorgerufen werden, auch wenn die Teile mechanisch sehr fest miteinander verbunden sind, zum anderen werden die Kontaktstücke selbst durch die Stromkräfte beansprucht. Beides zusammen kann bei ungünstiger Ausführung der Kontaktstücke bewirken, daß während der Entladung der Kontaktdruck unzulässig geschwächt und die Kontaktfläche durch Lichtbögen verbrannt wird.

Für die Lösung dieser Schwierigkeiten bieten sich folgende Gesichtspunkte an: Zunächst sollten die auf das Kontaktstück selbst wirkenden Stromkräfte zu einer Erhöhung des Kontaktdruckes beitragen. Außerdem sollte das Kontaktstück federnd ausgebildet sein, damit auftretende Relativbewegungen der Kontaktfläche gegeneinander ohne Schwächung des Kontaktdruckes stattfinden können.

Zwei im Prinzip mögliche Konstruktionen zeigt Abb. 12b, c für den Fall, daß sich die beiden mit Hinleiter bezeichneten Bauteile während der Entladung nur in der Höhe gegeneinander verschieben. In beiden Ausführungsformen wird der Kontaktdruck durch die dargestellte Verschraubung der Kontaktstücke aufgebracht. In der Ausführung Abb. 12b bildet die Blattfeder A-A das elastische

Element, in der Ausführung 12c die jeweils mit B bezeichneten Stege.

Geeignete Kontaktstücke nach diesen Gesichtspunkten zu entwickeln, ist mit der Aufgabe verbunden, die Verbindung der Kontaktflächen hinsichtlich deren Relativbewegungen hinreichend weich elastisch, hinsichtlich der auf das Kontaktstück selbst wirkenden Stromkräfte aber genügend fest zu gestalten. Insofern ist die Ausführung nach Abb. 12c der nach Abb. 12b überlegen. Denn in der letzteren wird das elastische Element durch die Stromkräfte auf Biegung beansprucht, erfährt also eine Beanspruchung, der gegenüber das Element aber "weich" sein soll, um die Relativbewegungen der Kontaktflächen auszugleichen. In Abb. 12c dagegen wird das elastische Element durch die Stromkräfte auf Druck beansprucht, während der Ausgleich der Relativbewegungen über eine Biegebeanspruchung erfolgt.

6. Die Ausführung eines Kollektorsystems nach den besprochenen Richtlinien setzt die Lösung einer großen Zahl konstruktiver Aufgaben voraus. Sie hier im einzelnen zu behandeln, würde zu weit führen. Jedoch bestimmen sie das Bild des endgültigen Kollektorsystems. Abb. 13^{*)} zeigt die Ausführung eines aus drei dicken und zwei dünnen Platten bestehenden Kollektormodells mit einer Spulenlänge von 10 cm. Es dient der Erprobung der Konstruktion und soll die Grundlagen für den Bau eines Systems aus 40 dicken und 39 dünnen Platten bei einer maximalen Spulenlänge von 150 cm und einer magnetischen Feldstärke bis 150 kG in der Spule liefern. Die Konstruktion wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Brown, Boveri & Cie., Mannheim, durchgeführt, die auch das Kollektormodell hergestellt hat.

^{*)} Der Firma Brown, Boveri & Cie. wird für die Überlassung der Abbildung gedankt.

7. Zum Abschluß seien die wesentlichen Vorzüge des beschriebenen Kollektorsystems gegenüber einem Doppelplattenkollektor zusammengefaßt:
- a) Die Gesamtinduktivität ist geringer; denn die Induktivität des Plattenstapels und der Übergangsstücke kann infolge der elektrischen Parallelschaltung sehr klein gehalten werden, und die Induktivität der Sammelschienen ist wegen ihrer Kürze ebenfalls klein.
 - b) Die durch die mechanische Verspannung abzufangenden Stromkräfte sind kleiner; im Plattenstapel wegen der geringen Stromdichte, bei den Übergangsstücken und Sammelschienen wegen den im Vergleich mit dem Plattenkollektor kleinen Flächen.
 - c) Die Sammelschienen sind kontinuierlich über die gesamte Breite verspannt. Die stromführende Fläche wird durch die Verspannung nicht verkleinert.
 - d) Das dynamische Verhalten des Systems kann unter den endgültigen Belastungsverhältnissen bereits an einem sehr kurzen Modell vollständig untersucht werden.
 - e) Die Isolationsfolie wird überall im System, auch während der Entladung, mechanisch nicht beansprucht.
 - f) Für den Anschluß der Kabel steht die gesamte rückwärtige Fläche des Plattenstapels zur Verfügung. Es brauchen daher keine komplizierten Anschlußstücke verwendet werden, wie sie Abb. 2 für den Doppelplattenkollektor zeigt.
 - g) Das System ist, abgesehen von den Sammelschienen, nur so breit, wie die Spule lang ist. Wird eine erheblich längere Spule aus experimentellen Gründen wünschenswert, so kann das System mühelos verbreitert werden, wobei alle Teile bis auf die Sammelschienen weiterverwendet werden können. Das System ist sozusagen nach dem Baukastenprinzip zusammen-

gesetzt. Das hat den weiteren Vorteil, daß im Fall eines elektrischen Durchschlages die zerstörten Teile leicht ausgewechselt werden können.

LITERATUR

- [1] H. Fay, E. Hintz
Richtlinien für den Bau betriebssicherer Kondensatorbatterien
mit niedriger Induktivität und grossem Energieinhalt.
KFA-Bericht, in Vorbereitung
- [2] A.C. Kolb, et al.
A high energy magnetic compression experiment.
Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research
Salzburg 1961

Herrn Professor Dr. W. Fucks und Herrn Dr. H.L. Jordan danken wir herzlich für die Anregungen und die ständige Unterstützung, mit der sie das Projekt gefördert haben.

Besonderer Dank gebührt der Firma Brown, Boveri & Cie. A.G., Mannheim, die die Konstruktion und Fertigung des Kollektors übernommen hat. Ohne deren technische Erfahrungen und Herstellungsmöglichkeiten hätte der Bau des Kollektors für das Institut eine kaum durchführbare Aufgabe dargestellt.

Allen unseren Mitarbeitern, insbesondere den Herren Bohn und Stickelmann, sowie den beteiligten Mitarbeitern der Firma Brown, Boveri & Cie., Mannheim, danken wir für die vielen Anregungen.

TABELLE I

Material	elektr. Leitf. σ_e $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$	Skintiefe $t(25 \text{ kHz})$ mm	Streckgrenze σ_m kp/mm ²	B_{max} kG	j_{max} kA/cm
Kupfer	$59 \cdot 10^6$	0,4	~ 5	~ 110	~ 90
Cu - Be	$17 \cdot 10^6$	0,75	~ 100	~ 500	~ 400
Messing	$12,5 \cdot 10^6$	0,85	~ 30	~ 270	~ 220
Stahl	$2 \cdot 10^6$	2	~ 60	~ 390	~ 310

Erläuterung: $\frac{B_{\text{max}}^2}{2 \mu_0} = \sigma_m$ $B_{\text{max}} = \frac{4 \pi}{10} j_{\text{max}}$

$$t = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \sigma_e \pi f}} \quad \text{für } f = 25 \text{ kHz}$$

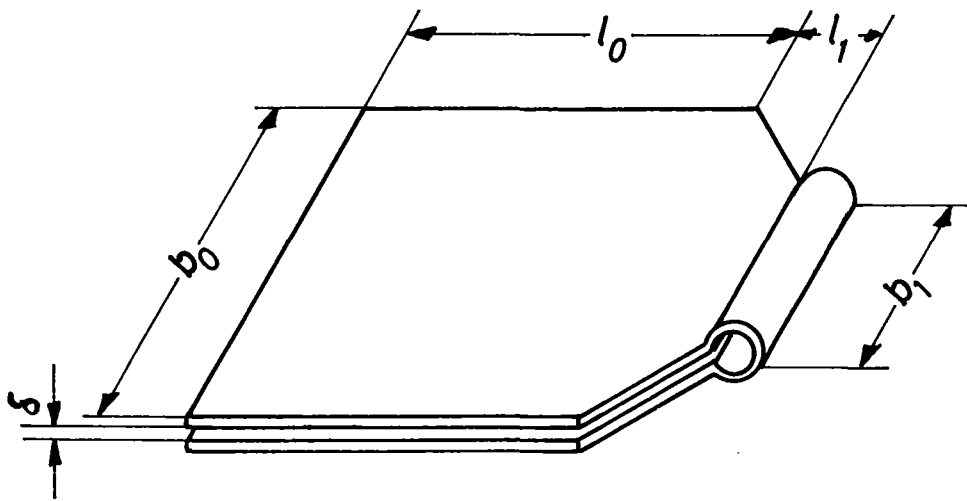


Abb.1

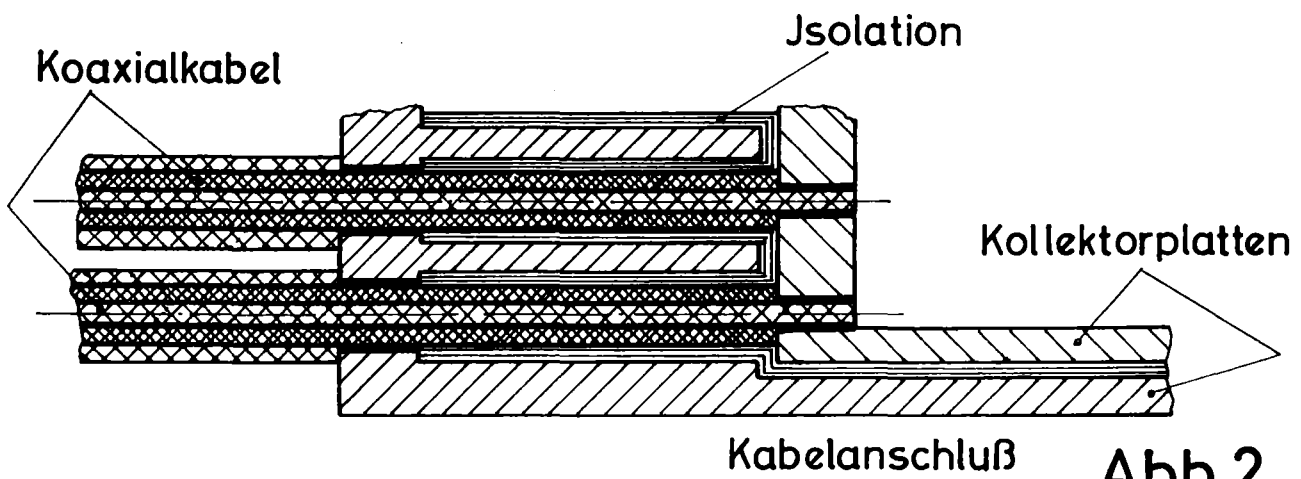


Abb.2

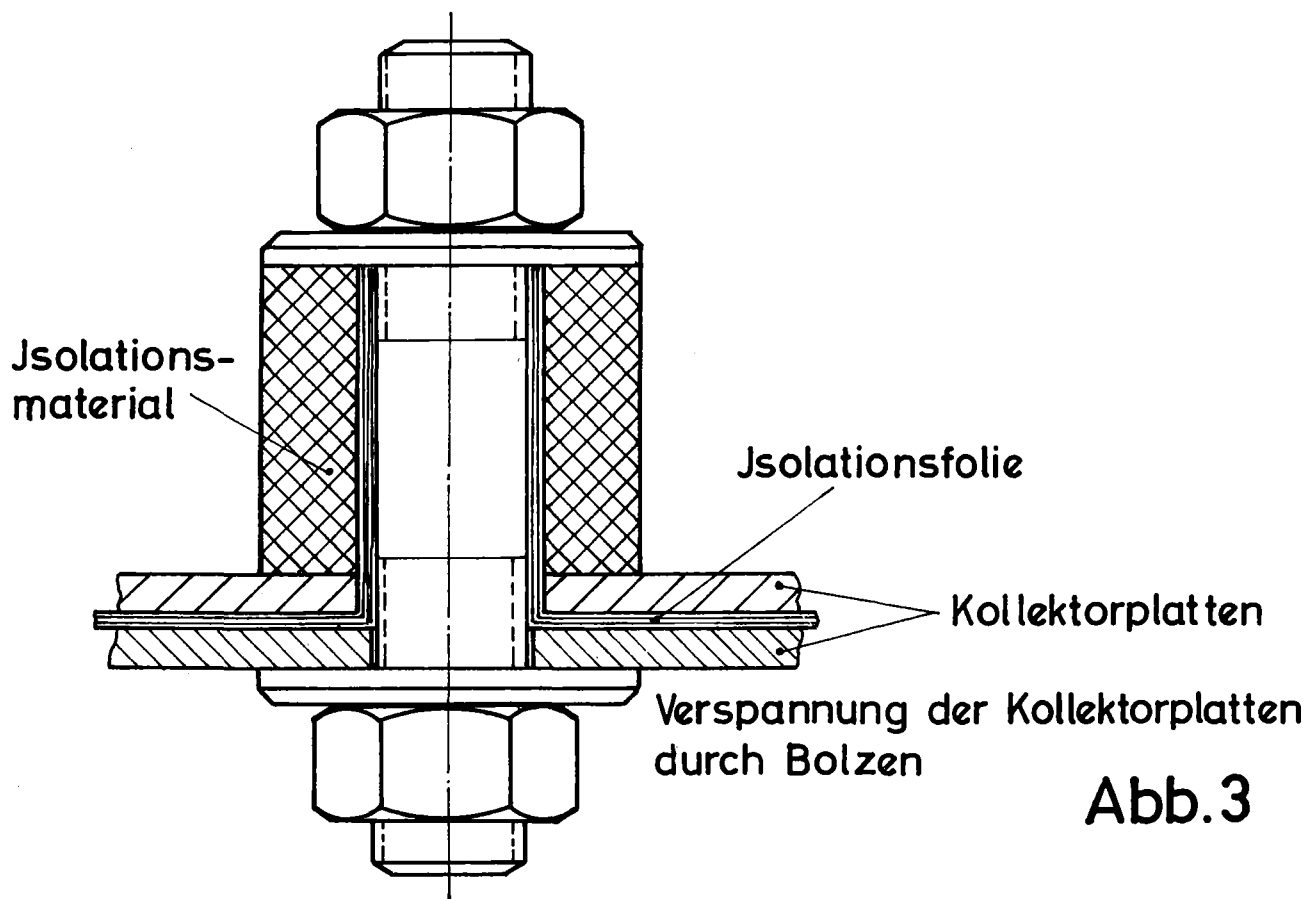


Abb.3

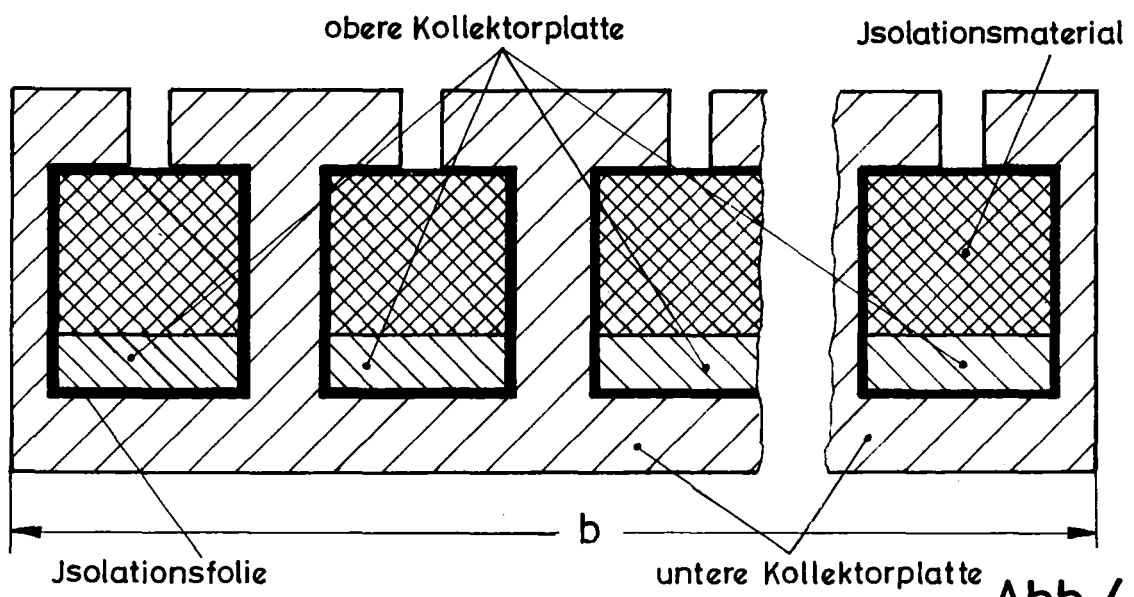


Abb.4

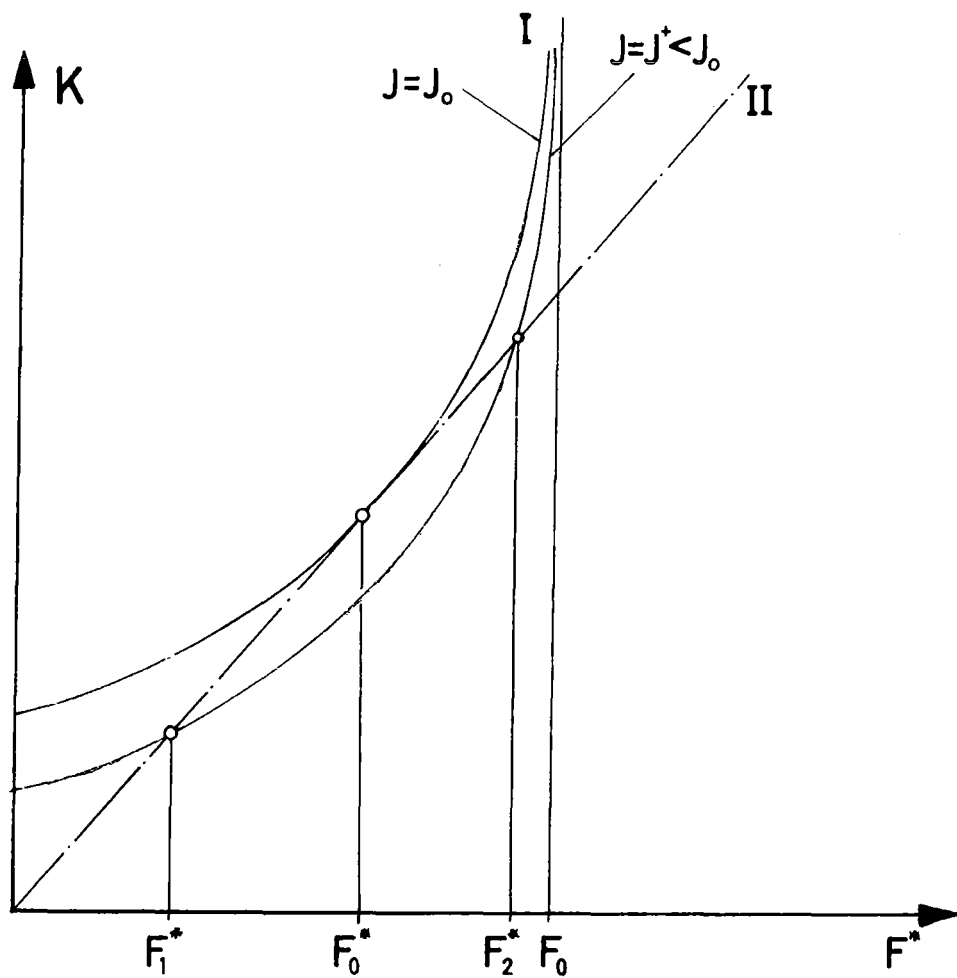


Abb.5

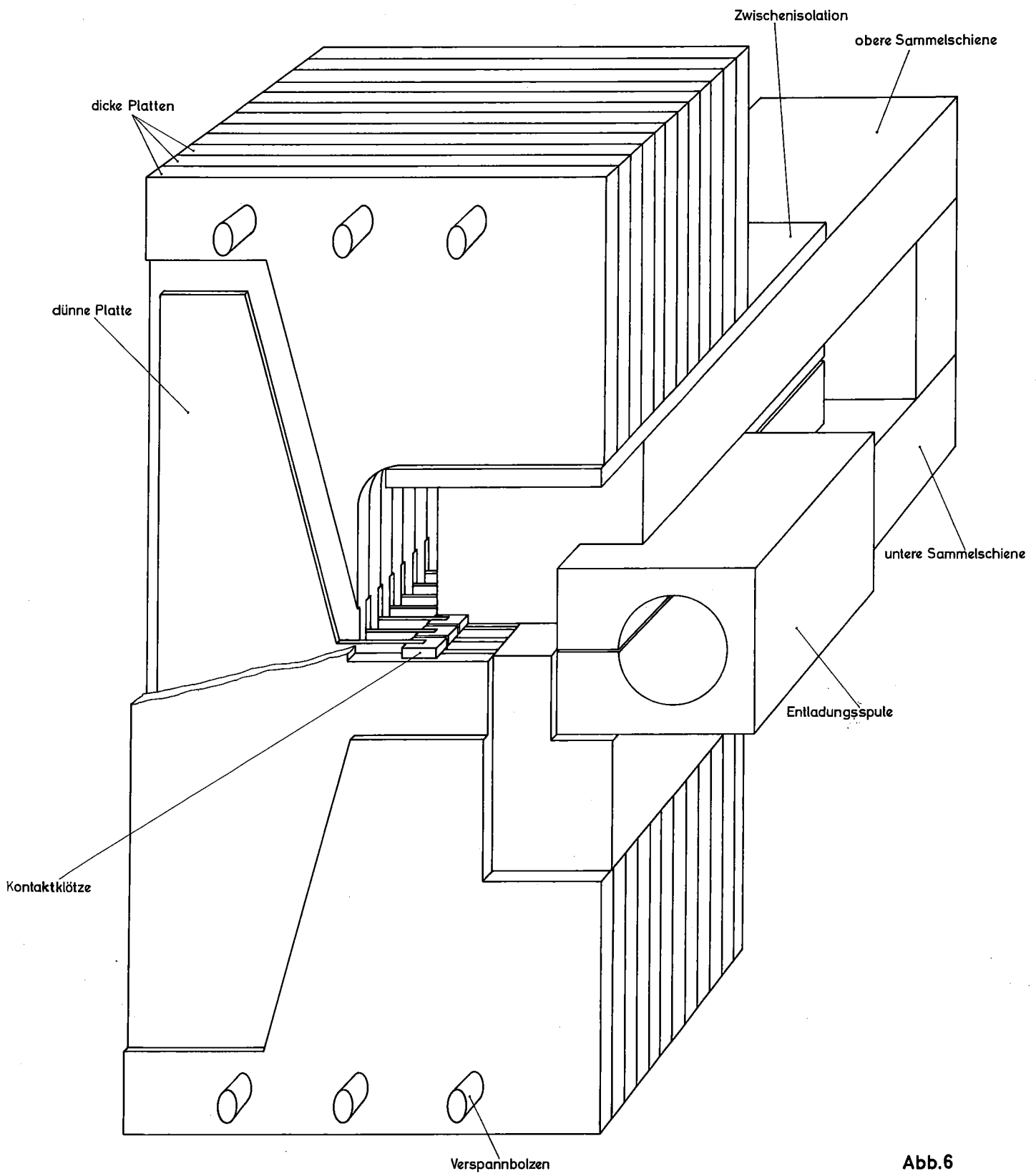


Abb.6

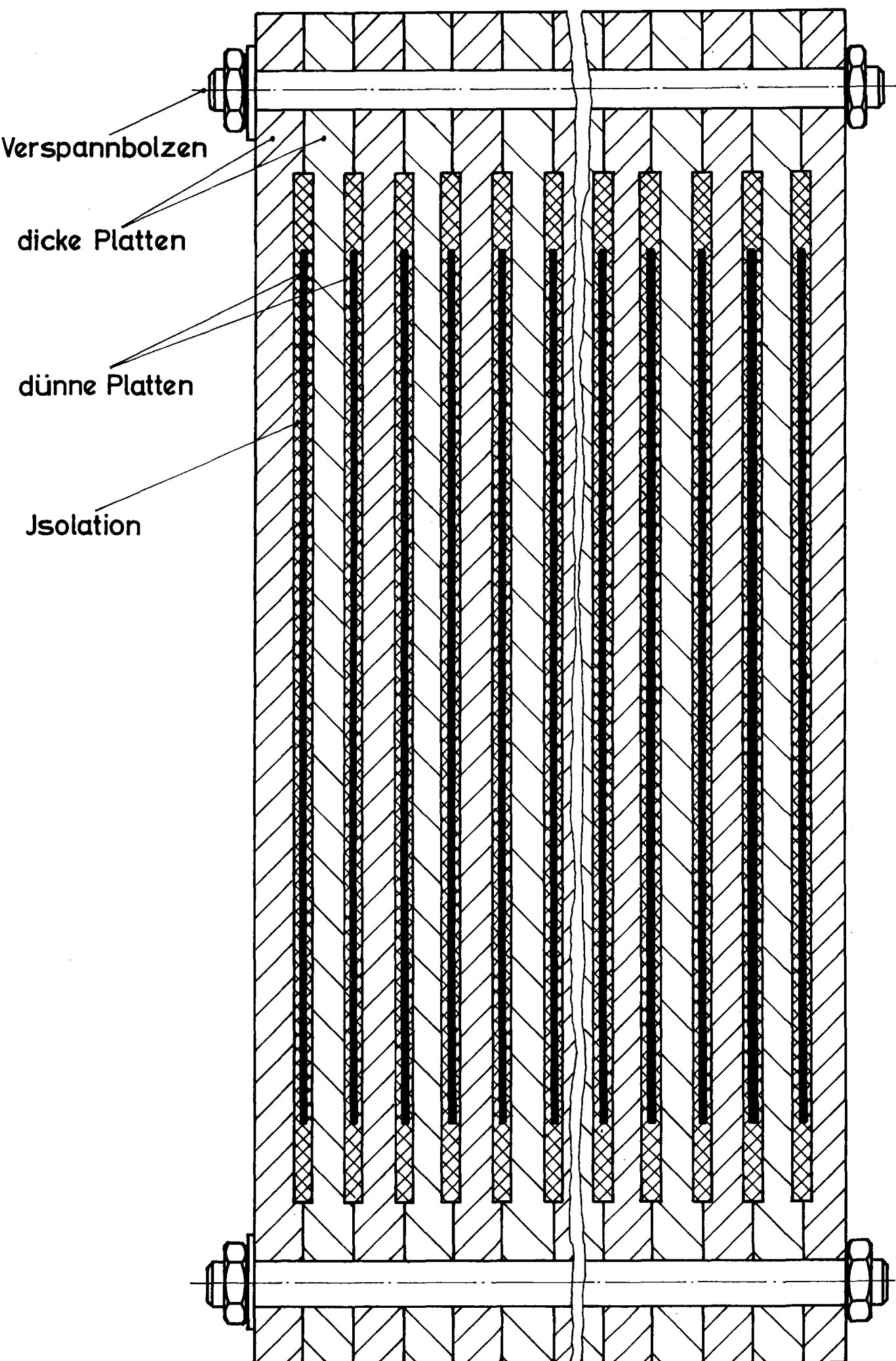
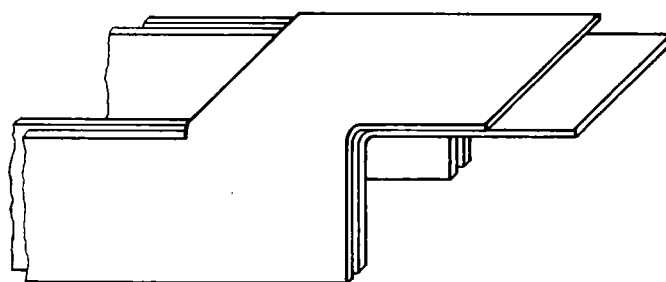
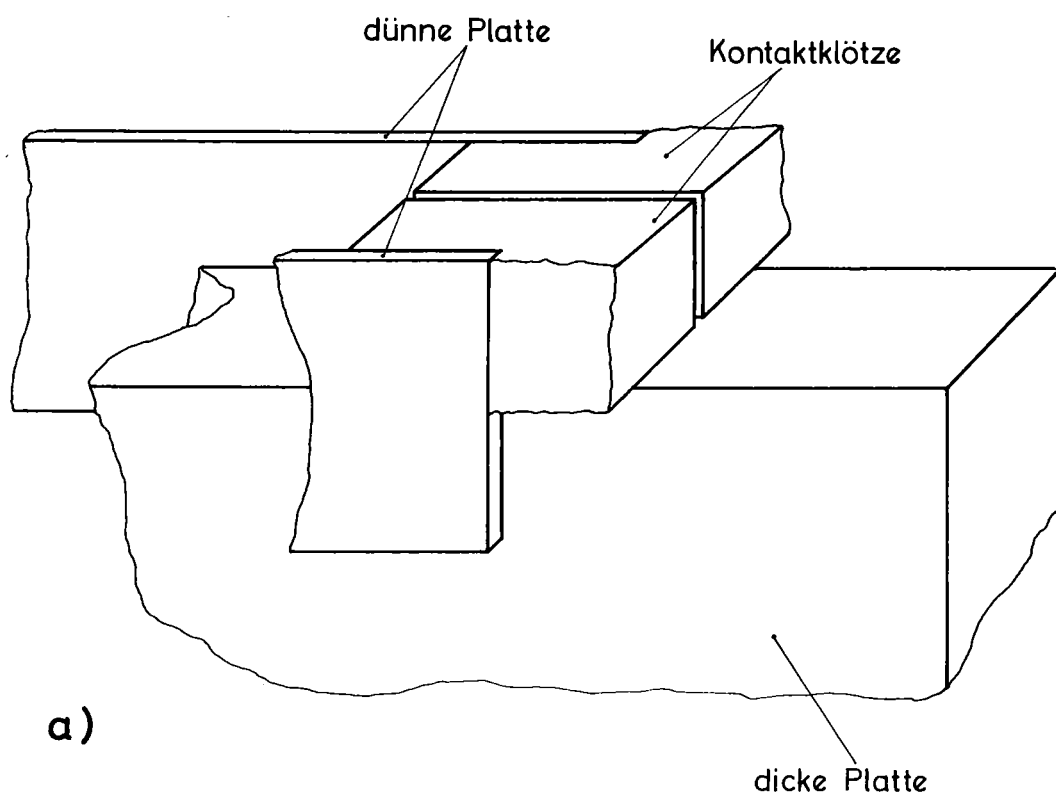
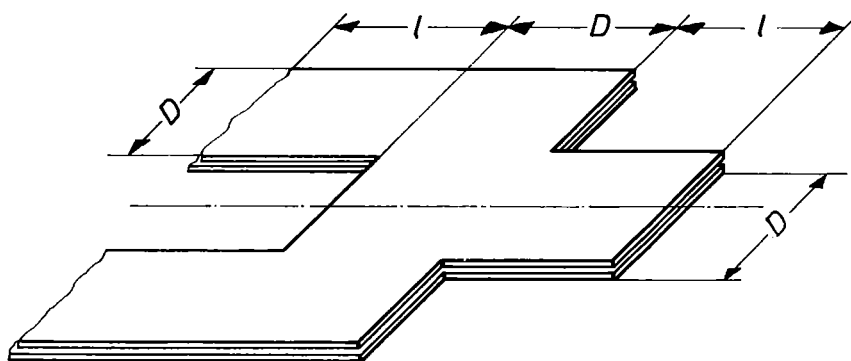


Abb.7



b)



c)

Abb. 8

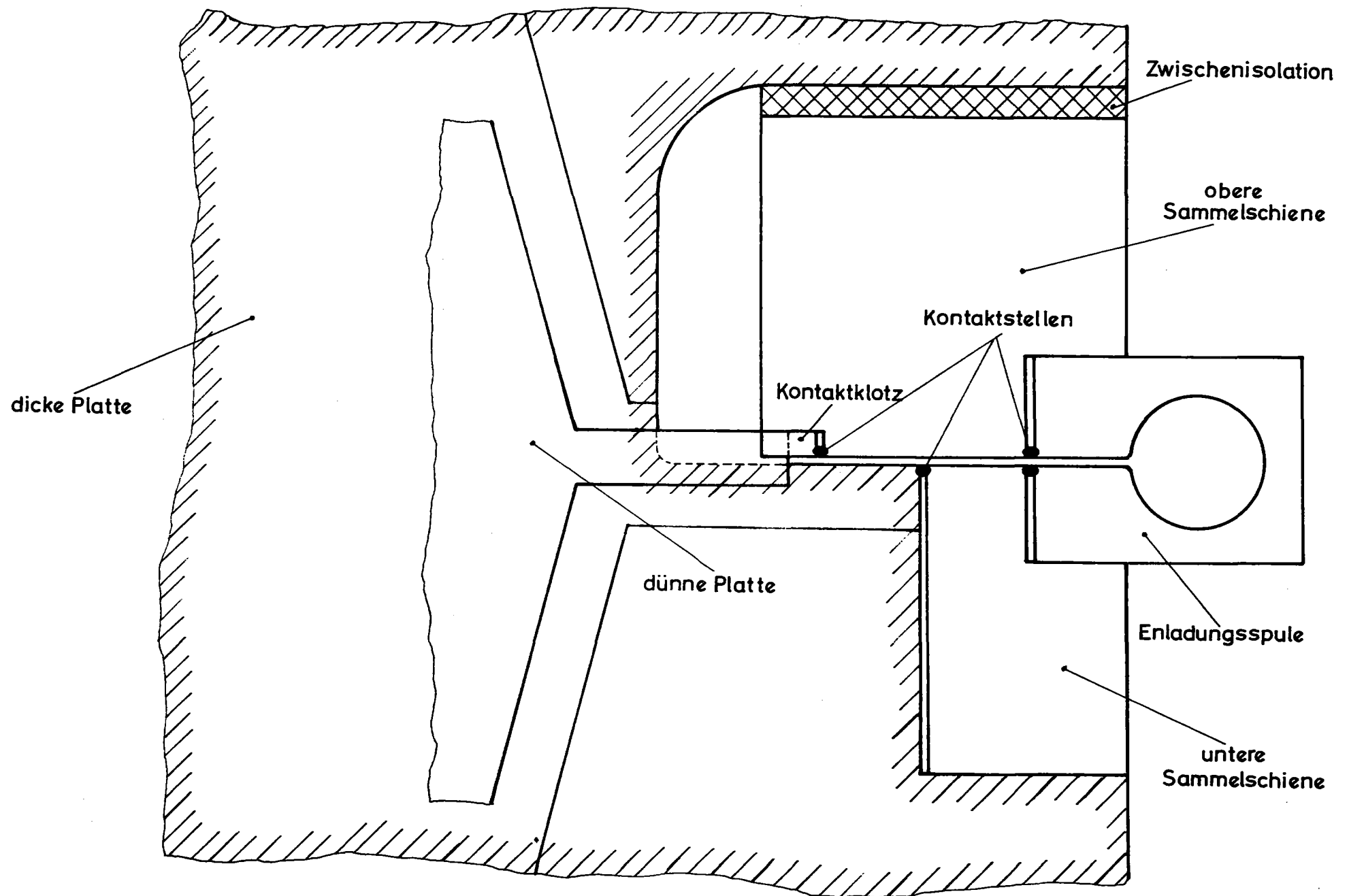


Abb.9

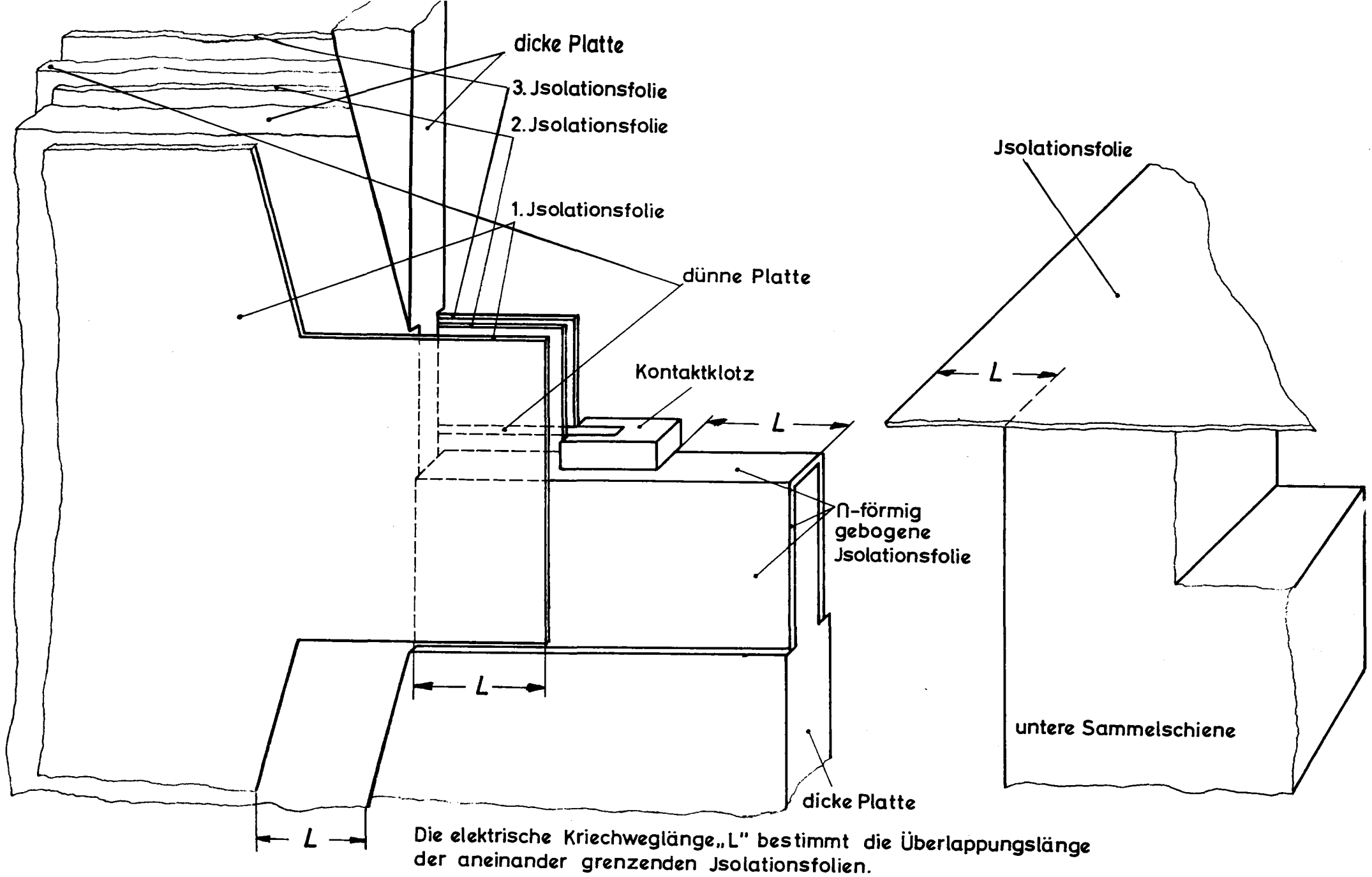


Abb.10

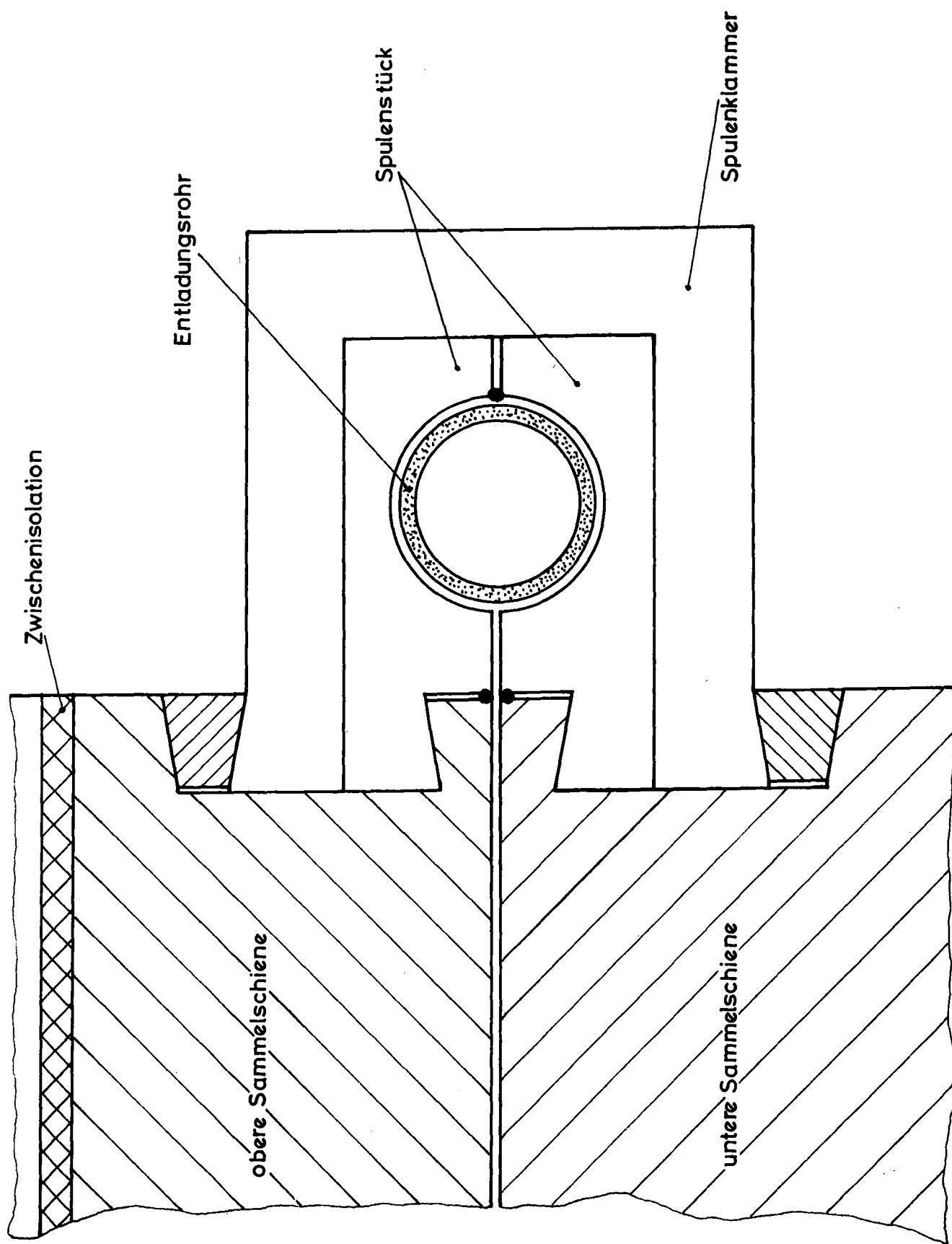
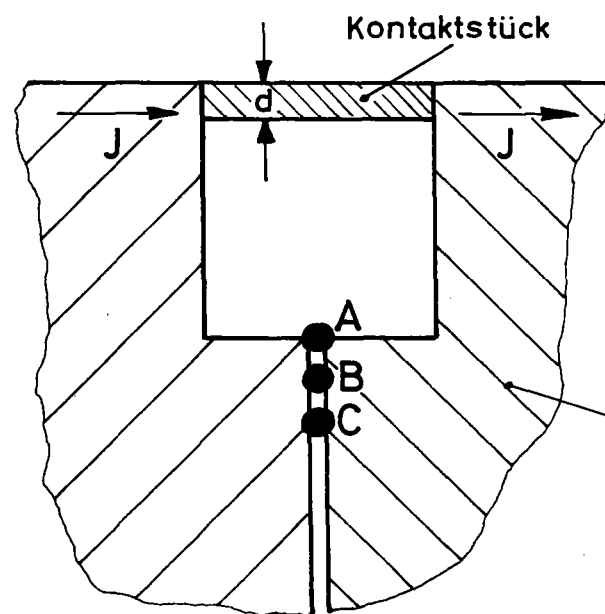
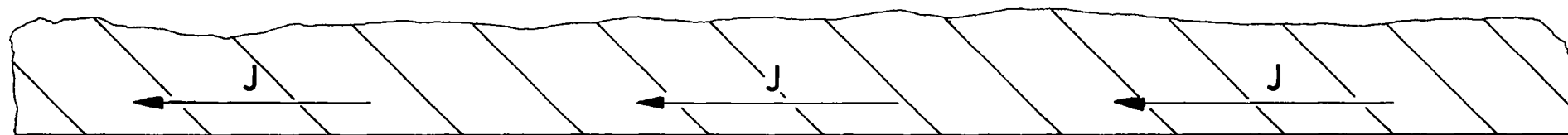
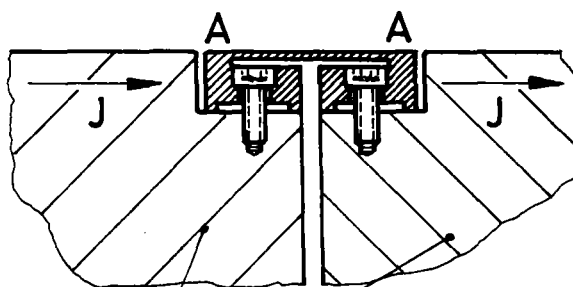


Abb.11

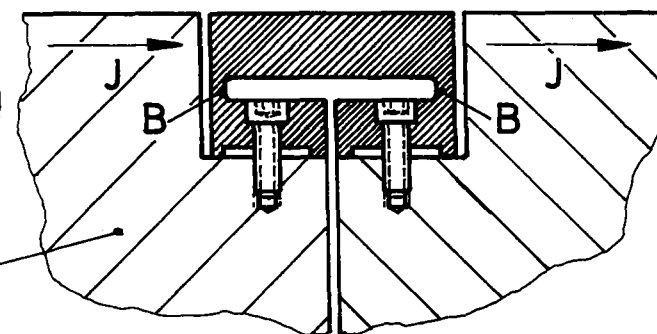
Rückleiter



a)



b)



c)

Hinleiter

Abb.12

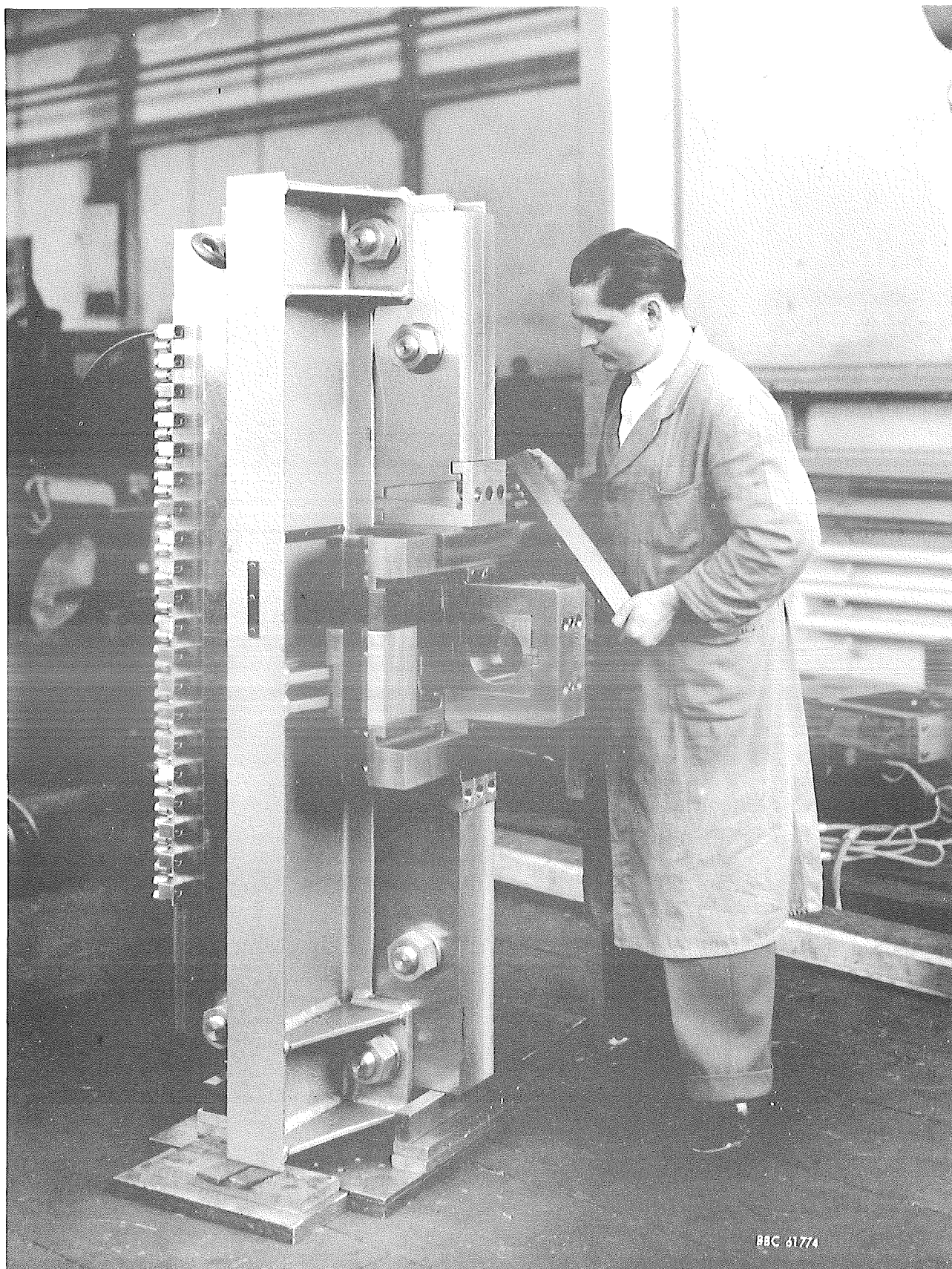


Abb. 13

Leistungsfähige Maschine für die
Produktion von...